



TITLE:

Improvement of ON-Characteristics in SiC Bipolar Junction Transistors by Structure Designing Based on Analyses of Material Properties and Carrier Recombination(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Asada, Satoshi

CITATION:

Asada, Satoshi. Improvement of ON-Characteristics in SiC Bipolar Junction Transistors by Structure Designing Based on Analyses of Material Properties and Carrier Recombination. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21772>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-03-23に公開

京都大学	博士（工学）	氏 名	浅田 聡志
論文題目	Improvement of ON-Characteristics in SiC Bipolar Junction Transistors by Structure Designing Based on Analyses of Material Properties and Carrier Recombination (材料物性およびキャリア再結合の解析に基づいたデバイス構造考案によるSiC バイポーラトランジスタのオン特性向上)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、広禁制帯幅半導体であるSiC（炭化珪素）パワートランジスタの高性能化を目指して、SiC半導体の電子物性、キャリア再結合に関する材料研究と、これを基にしたSiCバイポーラトランジスタの電流増幅率とオン抵抗の改善に関するデバイス研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられる半導体パワーデバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を紹介した後、SiC半導体の性質とSiCパワーデバイスの有用性を述べている。特に、高耐圧応用で有望なSiCバイポーラトランジスタ（npn型）の特徴と研究の現状を概説し、電流増幅率やオン抵抗に大きな課題があることを述べている。また、これらのデバイス特性を向上する上で、SiC半導体の基礎物性を明らかにする重要性についても触れて、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、まずnpn型バイポーラトランジスタにおいて鍵を握るp型SiCの電子物性が依然として不明な点が多く、その物理的理解が進んでいないことを述べている。これを明らかにするために、広い範囲でアクセプタ密度を変化させたp型SiC厚膜結晶を準備して、ホール効果によってキャリア密度、移動度、抵抗率を広い温度範囲で評価し、移動度や抵抗率のアクセプタ密度依存性および温度依存性を半導体物理の観点で解析している。特に、高濃度p型SiCではホール散乱因子が1を大きく下回ることを実験的に見出し、これをSiC特有の価電子帯の強い異方性と非放物線性と関連付けて解析した成果は特筆できる。また、p型SiCの抵抗率のアクセプタ密度依存性、温度依存性を正確に記述する解析式を提唱し、バイポーラトランジスタの設計やSiC集積回路の設計に有用であることを示している。さらに、p型SiCの発光スペクトルを解析することにより、非破壊かつ電極形成不要でアクセプタ密度を決定する手法を提案している。</p> <p>第3章では、200以上という高い電流増幅率を有するSiCバイポーラトランジスタの電気的特性を広い温度範囲、広い電流範囲で測定、解析し、電流増幅率の制限要因を議論している。特に、SiCではp型ベース内のAlアクセプタの不完全イオン化が生じるために正孔密度が低くなり、高電流動作時に容易に高注入状態となってエミッタ接合の電子注入効率が低下しうることを指摘したのは新しい知見である。また、様々なサイズを有するSiCメサ型pnダイオードを作製し、電流－電圧特性のサイズ依存性を解析することにより、キャリア再結合はバルク中ではなく、ほぼ全てメサ側壁で生じていること、およびこの結果を用いてメサ側壁におけるキャリア再結合速度を決定できることを示している。メサ側壁のパッシベーションとして、酸化膜形成後に窒化処理を施すことにより、キャリアの表面再結合速度を約1/20に低減できることを見出している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏 名	浅田 聡志
<p>第4章では、SiCバイポーラトランジスタにおいて特有の問題である高いベース拡がり抵抗に着目し、実験、数値計算によるデバイス特性解析、および回路解析による動作特性の考察を通じて、高性能トランジスタを実現するために必要な設計指針を提示している。従来、SiCバイポーラトランジスタではオン電圧が異常に高いことが問題視されていたが、その原因が不明であった。申請者は、SiCトランジスタにおける高いベース拡がり抵抗がコレクタ特性に及ぼす影響を考察し、p型ベース／n型コレクタで構成される寄生ダイオードの動作がトランジスタ本体の動作を阻害していることを見出した。次に、この現象を、等価回路を用いた回路解析、および二次元デバイスシミュレーションの2つの方法により定量的に実証した。これらの結果を基にして、オン電圧増大を防ぐ設計指針（ベース拡がり抵抗、コレクタ抵抗、電流増幅率の間で満足すべき条件）を提示し、これを満たせば低いオン電圧を得られることを示した。さらに、SiCトランジスタを実用化する上で重要なマルチフィンガー構造においてベース拡がり抵抗と寄生ダイオードの影響を系統的に調べ、最も良好な特性が得られるトランジスタ構造を提案している。具体的には、適度にエミッタフィンガーを間引くことにより、寄生ベース領域からコレクタ領域への正孔注入が促進されて強い伝導度変調効果が発現し、オン抵抗やオン電圧を低減できることを見出している。この結果は単純な考察では予測できない重要な知見であり、SiCバイポーラトランジスタを実用化する上で重要な成果である。</p> <p>第5章では、第2～4章で得た成果を基にして独自のベース構造を有する耐圧3kV級のSiC npn型バイポーラトランジスタを作製し、その特性を解析した結果を述べている。寄生ベース領域にAlイオン注入を施してベース拡がり抵抗を低減することにより、コレクタ領域へのキャリア注入を促進し、$2\text{m}\Omega\text{cm}^2$という低いオン抵抗と低いオン電圧を達成している。このオン抵抗は、耐圧維持層となるn型コレクタ領域のドナー密度と厚さで決まるユニポーラ抵抗の約50%の値である。従来はコレクタ領域のユニポーラ抵抗より数倍大きいオン抵抗しか得られていなかったもので、本研究で得られた成果は画期的であり、SiCバイポーラトランジスタでは初めて伝導度変調効果を得たと言える。また、寄生ベース領域にAlイオン注入を施しても電流増幅率にはほとんど影響を与えず、低いオン抵抗に加えて147という高い電流増幅率を同時に達成している。</p> <p>第6章は結論であり、p型SiCの電気的性質の評価と特異性、SiCバイポーラトランジスタの電流増幅率の主な制限要因の特定、メサ側壁におけるキャリア再結合速度の決定、優れたオン特性を得るために満たすべき条件の提示、独自構造を有する耐圧3kV級のnnp型バイポーラトランジスタにおける極めて低いオン抵抗の達成など、本研究を通じて得られた新しい知見を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、広禁制帯幅半導体であるSiC（炭化珪素）パワートランジスタの高性能化を目指して、SiC半導体の電子物性、キャリア再結合に関する材料研究と、これを基にしたSiCバイポーラトランジスタの電流増幅率とオン抵抗の改善に関するデバイス研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. ベース領域となるp型SiCのキャリア密度、移動度、抵抗率を広い温度範囲で評価し、移動度や抵抗率のアクセプタ密度依存性、温度依存性を明らかにした。また、p型SiCの発光スペクトルを解析することにより、非破壊かつ電極形成不要でアクセプタ密度を決定する手法を提案した。実験的に得られた特異な電子物性をSiCの価電子帯の構造と関連付けて議論した。
2. 高い電流増幅率を有するSiCバイポーラトランジスタの特性を広い温度範囲、広い電流範囲で測定、解析し、電流増幅率の主な制限要因を明らかにした。また、様々なサイズを有するSiCメサ型pnダイオードの電流－電圧特性を解析することにより、メサ側壁におけるキャリア再結合速度を決定すると共に、酸化膜/SiC界面の窒化処理によりキャリアの表面再結合速度を約1/20に低減できることを見出した。
3. SiCバイポーラトランジスタにおいて特有の問題である高いベース拡がり抵抗に着目し、実験、数値計算によるデバイス特性解析、および等価回路を用いた回路解析による動作特性の考察を通じて、優れたオン特性を得るために満たすべき条件（ベース抵抗、コレクタ抵抗、電流増幅率の間の関係式）を提示した。また、実用化する上で重要なマルチフィンガー構造においてベース拡がり抵抗と寄生ダイオードの影響を系統的に調べ、最も良好な特性が得られるトランジスタ構造を明らかにした。
4. 上述の成果を基にして独自のベース構造を有する耐圧3kV級のSiCバイポーラトランジスタを作製し、オン特性を著しく改善することに成功した。具体的には、寄生ベース領域にAlイオン注入を施してベース拡がり抵抗を低減することにより、コレクタ領域へのキャリア注入を促進し、SiCバイポーラトランジスタでは初めて伝導度変調効果（優れたオン抵抗）を得ることに成功した。また、キャリアの再結合を低減することにより、高い電流増幅率も同時に達成した。

以上、要するに、本論文は高耐圧パワーデバイスとして有望なSiCバイポーラトランジスタの性能を支配するp型SiCの電子物性の解明、メサ側壁におけるキャリア再結合の低減、優れたオン特性を得るために満たすべき条件および実用的に最も適したデバイス構造の提示を行い、これらの成果を集約して耐圧3kV級のSiCバイポーラトランジスタで革新的に優れたオン特性を達成したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。